

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ УЗЛОВ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПИЩЕВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ СИСТЕМ

**А.И. Ремнев,**

*доктор технических наук, доцент,*

*профессор кафедры технологии продуктов питания, НИУ «БелГУ»*

**И.Ю. Коротких,**

*старший преподаватель кафедры технологии продуктов питания, НИУ «БелГУ»*

**Ю.А. Болтенко,**

*кандидат технических наук, доцент,*

*доцент кафедры технологии продуктов питания, НИУ «БелГУ»*

**И.Г. Зиновьева,**

*старший преподаватель кафедры технологии продуктов питания, НИУ «БелГУ»*

*Аннотация. В работе рассмотрена методология разработки и расчёта технологического процесса формирования элементов изгиба оперённых монометаллических и биметаллических труб с минимальным и минимально возможным радиусами путем моделирования на ЭВМ элементов изгиба и их дизайна. Предложенная методология позволяет производить необходимые расчеты для определения основных параметров технологического процесса изгиба оперённых труб и обеспечивает получение качественных изгибов при минимальном и минимально возможном радиусах изгиба трубы. Эти технологии изгиба оребренных труб не имеет аналогов в мировой практике и содержит «ноу-хау».*

*Ключевые слова: холодильные системы теплообмена, технология изготовления элементов холодильных систем, оперённые трубы, изгиба оперённых труб и расчёт.*

**Введение.** В качестве теплоотводящих элементов (охладителей) для конструкций систем теплообмена (СТ) наиболее перспективными являются трубы с наружным и внутренним оребрением, изогнутые в змеевиковый (петлевой) элемент (змеевик) [1, 2].

Витые змеевиковые элементы из оперённых труб применяются в различных СТ, например, в центрифугах, испарителях, и других. Конструкции витых змеевиковых элементов могут быть однозаходными или многозаходными с требуемым наружным диаметром (рис. 1, а) и шагом навивки. Точность изготовления витых змеевиковых элементов зависит от требований к конструкции СТ.

**Методы и организация исследования.** Основным видом многих конструкций СТ является плоские змеевиковые элементы петлевой формы (рис. 1, б), которые имеют необходимое количество изгибов. При этом новые петлевые змеевидные элементы выполняют с минимальным и минимально возможным радиусами изгиба, которые находятся в пределах 1.0...2.0 диаметра оперённой трубы. Предлагаемая технология изгиба оперённых труб (см. рис. 1, в - к), установка для их изготовления, наиболее полно могла бы удовлетворять всем требованиям заводов-изготовителей, выпускающих аналогичные СТ из элементов змеевикового типа [3 -7].

Исходная цельнотянутая труба при накатке различного профиля рёбер испытывает сложную упруго-пластическую деформацию, вследствие глубокой вытяжки рёбер, сопровождающиеся концентрацией напряжений на участках их формирования, т.е. получают наклёп. При этом сформированные пластической деформацией ребра имеют значительную прочность по сравнению с материалом сечения трубы не подвергающемуся деформации. В связи с этим при выполнении изгиба труба утончается на участке оперённой трубы с минимальным радиусом изгиба. Известно также, что даже незначительные осевые растягивающиеся усилия, превышающие предел текучести материала трубы, вызывают образование разрыва оболочки трубы на участке ее изгиба. Для получения качественного изгиба трубы ее на участке изгиба нагружают осевой силой (осевое осаживание)

превышающей предел текучести материала трубы. Осевое сжатие оперённой трубы обеспечивают с помощью пневмоцилиндров. Оптимальное осевое усилие относительно нейтрального сечения оболочки трубы, передаваемое штоком пневмоцилиндра, определяют экспериментальным или расчётным путем.

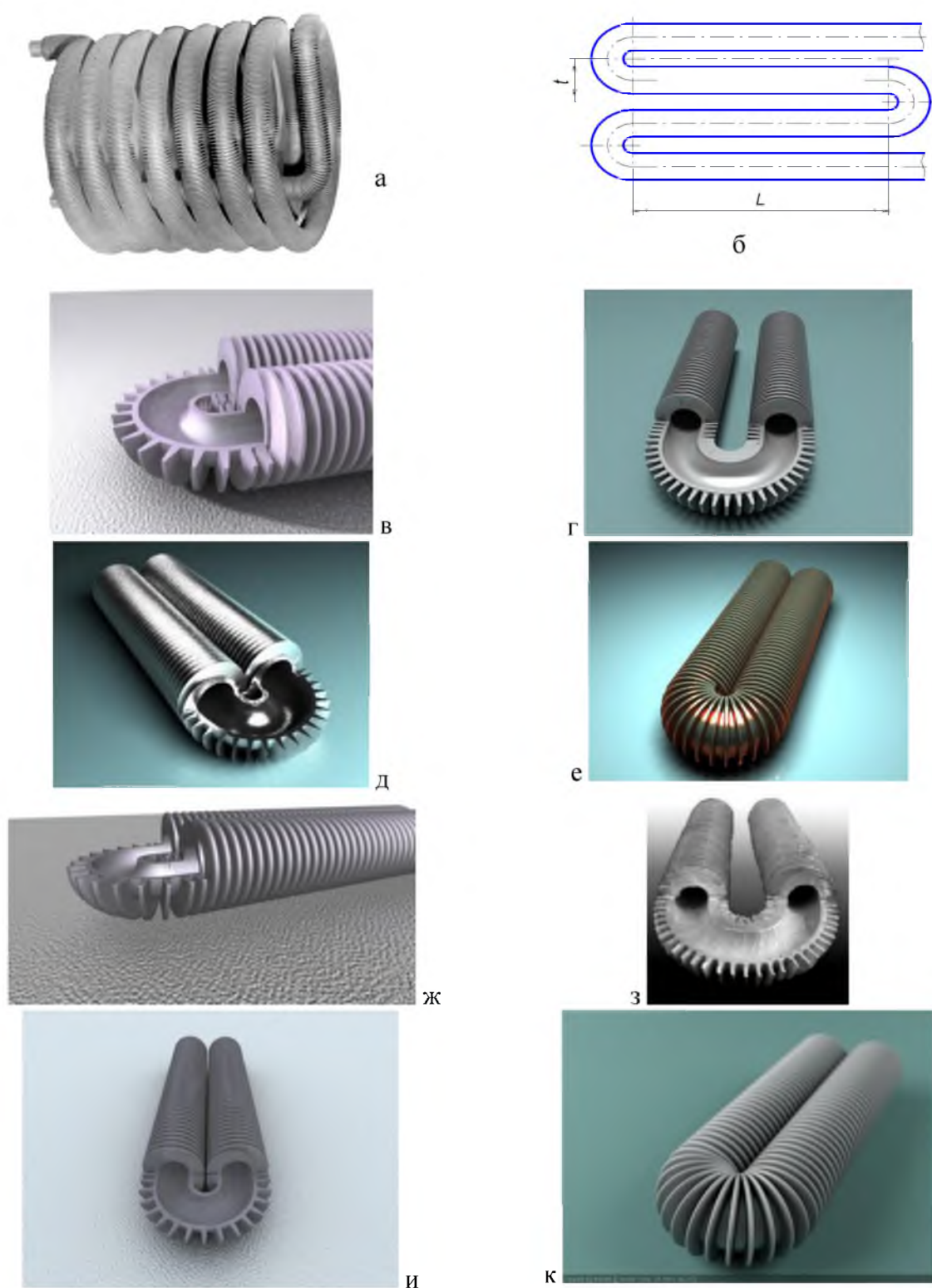


Рис. 1. Общий вид изгибов оперённых труб для СТ с профилем рёбер прямоугольного, треугольного, трапецидального и с радиусным округлением: а и б - витого пространственного и петлевого змеевиковых элементов; в - к изгибы монометаллических и биметаллических оперённых труб с минимальным и минимально возможным радиусами изгиба с рёбрами различного профиля

При назначении режимов для трубогибочного оборудования необходимо определить значение требуемого изгибающего момента в зависимости от известных параметров труб (геометрических размеров и предел текучести материала трубы, модуль упругости и радиуса изгиба и др. параметров). Если принять для упрочнённого материала оперённой трубы условную диаграмму напряжения-деформации в поперечном сечении оперённой трубы, то можно получить с высокой степенью точности формулу для определения изгибающего момента [5, 7].

Известно, что не только при изгибе труб круглого сечения сталкиваются со значительными трудностями, но и при изгибе оперённых труб с минимальным и минимально возможным радиусами изгиба. Оперённые монометаллические трубы без разработки надёжной технологии изгиба, не могут быть получены известными методами, и поэтому на уровне изобретения предлагается новая технология изгиба монометаллических и биметаллических оперённых труб [2, 6, 7].

При бездорновом изгибе оперённых монометаллических труб как с минимально возможным радиусом изгиба при наличии рёбер, так и с радиусом изгиба равным радиусу оперённой трубы необходимо учитывать силы, которые воздействуют на трубу в процессе изгиба, а также силы, которые обеспечивают возможность получения качественного изгиба с требуемыми параметрами [5, 6, 7].

Рассмотрим некоторые особенности технологического процесса формирования изгиба на оребренных трубах. Нейтральная ось, проходящая в поперечном сечении через центр тяжести прямой трубы, при изгибе смещается (рис. 2). Известно, что значение радиуса кривизны нейтрального слоя при чистом изгибе трубы принимают аналогично значениям радиуса при изгибе кривого бруса со сплошным поперечным сечением. Для получения истинной картины деформации труб при изгибе необходимо определять смещение нейтрального слоя, учитывая влияние изгиба, сдвига и утончения. При больших значениях коэффициента оребрения утончение стенки трубы практически отсутствует, за счет подкрепляющего эффекта ребер и им можно пренебречь. Смещения, вызываемые сплющиванием, при изгибе оребренных труб так же весьма незначительны, и наблюдаются только при изгибе труб с низким коэффициентом оребрения. Радиус кривизны нейтрального слоя при этом для сечения трубы, изображенного на рис. 2, определяются по формуле:

$$\rho = \frac{D_H - d_{\text{с.н.}}}{\delta \cdot K_c \left( \sqrt{R_{0\text{min}}^2 - \frac{d_{\text{с.н.}}^2}{4}} - \sqrt{R_{0\text{min}}^2 - \frac{D_H^2}{4}} \right)}, \quad (1)$$

где  $K$  – поправочный коэффициент, полученный при изгибе оперённых труб с учётом экспериментальных данных, зависящий от коэффициента оребрения. Для алюминиевых и медных сплавов зависимость поправочного коэффициента  $K_c$  от коэффициента оребрения можно определить графическим способом по эмпирическому графику (рис. 3).

Величина смещения нейтральной оси при одной и той же толщине стенки оперённой трубы зависит от ряда факторов, в том числе от величины и направления продольных сил. В зависимости от применяемой технологии изгиба, в материале трубы действуют различные продольные силы, и смещение нейтрального слоя определяется главным образом ими, а не законом смещения нейтрального слоя при чистом изгибе. Особенностью изгиба оперённых труб является то, что влияние продольных сил нейтрализуется осевыми силами, приложенными к участкам защемления трубы в сторону радиуса ее изгиба. Труба до изгиба, кроме установленных допусков, как по наружному диаметру, так и по толщине стенки, имеет разностенность. Технологический процесс формирования изогнутых труб является дополнительным источником разностенности в сечении. В процессе изгиба на внутренней части изгиба стенка трубы утолщается, а на наружной утончается.

При недопустимом утончении стенки трубы происходит ее разрушение (разрыв). По этому при изгибе труб стремятся предотвратить утончение стенки трубы.

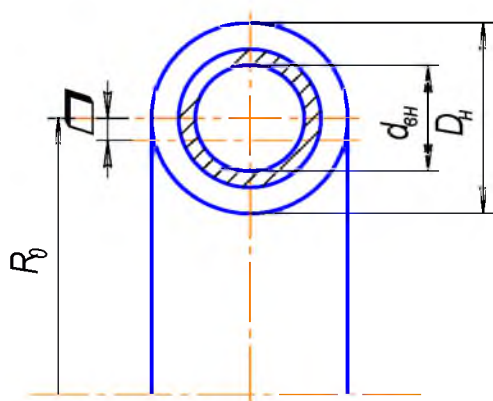


Рис. 2. Смещение центральной оси при изгибе оребренной монометаллической трубы

Характер распределения напряжений изогнутой трубы под воздействием внутреннего давления существенно отличается от напряжений в прямых трубах. Это объясняется наличием на участках изгиба поверхностей двоякой кривизны (рис. 4). Рассмотрим на такой поверхности элементарную прямоугольную площадку, по контуру которой действуют изгибающие силы:  $N_1$ ,  $N_2$  – силы, касательные к поверхности в главных направлениях, МПа;  $N'_2$  – осевая сила, приводящая сечение трубы в пластичное состояние, МПа.

Из приведённой схемы можно вывести следующую зависимость:

$$\frac{N_1}{\rho_1} + \frac{N_2 + N'_2}{\rho_2} = P \quad (2)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – главные радиусы кривизны (минимальный и максимальный), мм;  $P$  – внутреннее давление, МПа.

Обработка экспериментальных данных позволила установить зависимость диаметра трубы и минимально возможного при этом радиуса изгиба от осевого усилия сжатия.

В поперечном сечении изгиба найдём значения главных радиусов кривизны в любой точке, расположенной под углом  $\alpha$ . Центр первой кривизны  $R_1$  лежит в центре поперечного сечения колена, а центр второй кривизны  $R_2$  – в пересечении нормали рассматриваемой площадки с осью тора.

$$\text{Следовательно, } R_1 = R_H, \quad R_2 = R_H + \frac{R_0}{\sin \tau}.$$

Подставив эти значения в выражение (1) получим

$$\frac{N_1}{R_H} + \frac{N_2 + N'_2}{R_H + \frac{R_0}{\sin \tau}} = P \quad (3)$$

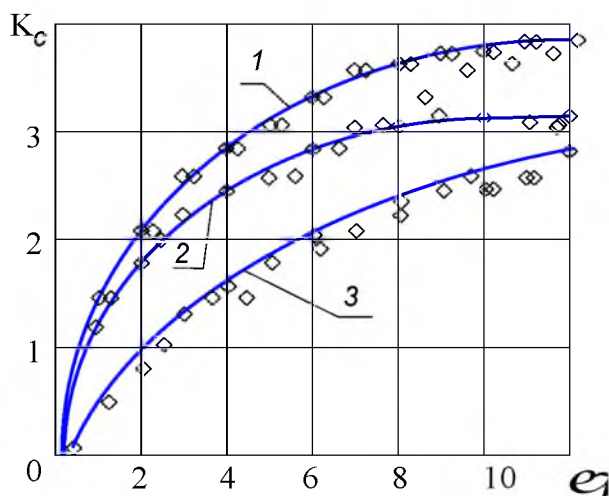


Рис. 3. Зависимость поправочного коэффициента смещения центральной оси при изгибе монометаллических оперённых труб от коэффициента оребрения: кривые 1, 2 и 3 – для алюминиевых, медных и медно-никелевых сплавов соответственно

Для упрощения расчёта будем считать, что продольные напряжения в кривой трубе распределяются равномерно, как и в прямой трубе, то есть

$$N_2 + N'_2 = \frac{P \cdot R_H}{2} \quad \text{После}$$

подстановки значения  $N_2 + N'_2$  в выражение (3) получим

$$\frac{N_1}{R_H} + \frac{\frac{P \cdot R_H}{2}}{R_H + \frac{R_0}{\sin \tau}} = P. \quad (4)$$

Решив уравнение (4) относительно  $N_1$  получим

$$N = \frac{P \cdot R_H \cdot 2R_0 + R_H \sin \tau}{2R_0 + R_H \sin \tau}, \quad (5)$$

что приводит к окончательному уравнению для приближенного определения напряжений от внутреннего давления в изогнутой трубе:

$$\sigma = \frac{P \cdot R_H \cdot 2R_0 + R_H \sin \tau}{2(R_0 + R_H \sin \tau)}. \quad (6)$$

При  $R = \text{const}$  наименьшие кольцевые напряжения  $\sigma_{\kappa \min}$  получаются при  $\tau = \frac{\pi}{2}$ ,

наибольшие  $\sigma_{\kappa \max}$  – при  $\tau = \frac{3}{2}\pi$ .

Отсюда следует, что в изогнутом участке, под действием внутреннего давления наиболее напряжёнными являются волокна на внутренней части изгиба.

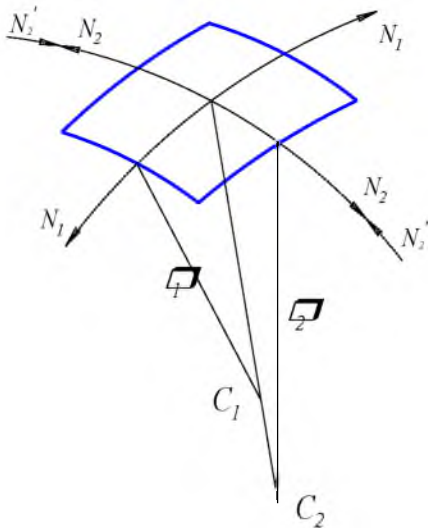


Рис. 4. Схема к расчёту возникающих усилий на элементарной наружной поверхности трубы двойкой кривизны

При увеличении радиуса изгиба  $R$  разность между  $\sigma_{\kappa \max}$  и  $\sigma_{\kappa \min}$  уменьшается и при  $R \rightarrow \infty$  эта разность стремится к нулю. С развитием пластических деформаций распределение напряжений в изгибе трубы изменится.

Изгиб труб сопровождается образованием овальности и уменьшением проходного сечения трубы. Перечисленные параметры зависят, главным образом, от радиуса изгиба, пластических свойств металла и параметров оребрения ( $D_H$ ,  $D_{BH}$ ,  $S$  и  $\Delta$ ), характеризующихся коэффициентом оребрения, то есть

$$(\theta), (\Delta F) = f\left(R_0, \frac{\sigma_T}{\sigma_s}, \frac{\delta}{\sigma_s}, \frac{\psi}{\sigma_s}, \varphi\right).$$

Кроме того, труба, имеющая овальную форму поперечного сечения изгиба, обладает меньшей прочностью. Овальность следует учитывать при работе трубы под внутренним давлением.

При искривлении формы в изгибе изменяются не только геометрические параметры (наружный диаметр и толщина стенки), но и физико-механические свойства материала трубы (предел текучести, удлинение, твёрдость).

Изогнутый трубный элемент, имеющий овальное сечение испытывает суммарные напряжения, возникающие от внутреннего давления среды, и дополнительные изгибающие в результате отклонения сечения от круглой формы. Эти напряжения у оперённой трубы, по сравнению с гладкой, значительно меньше за счёт подкрепляющего эффекта рёбер, то есть.



$$\sigma_{\Sigma} = [\sigma_{cp} + \sigma_{из}] \cdot K_{н.э} . \quad (7)$$

Эти суммарные напряжения на внутренней поверхности трубы во всех случаях должны быть меньше предела текучести материала трубы при рабочей температуре, т.е.

$\sigma_{\Sigma} < \sigma_T^t$ , откуда

$$\sigma_T^t > [\sigma_{cp} + \sigma_{из}] \cdot K_{нэ} = \sigma_{cp} + \sigma_p \frac{3\Delta r}{\delta} \psi , \quad (8)$$

где  $\sigma_p$  – напряжения, возникающие от внутреннего давления в трубе круглого сечения, МПа.

В ходе исследований установлено, что при чистом изгибе трубы большая ось овала располагается перпендикулярно плоскости изгиба трубы.

Процесс сплющивания схематически изображён на рис. 5. Труба, изогнутая по радиусу R, подвергается дальнейшему изгибу в той же плоскости. Выделим на трубе два сечения АВ и А'В'. При изгибе на внешней части изгиба возникнут растягивающие напряжения, а на внутренней части – сжимающие.

Растягивающие и сжимающие напряжения дадут равнодействующие поперечные силы Т, направленные к оси трубы. Они будут основными силами, вызывающими сплющивание сечения трубы.

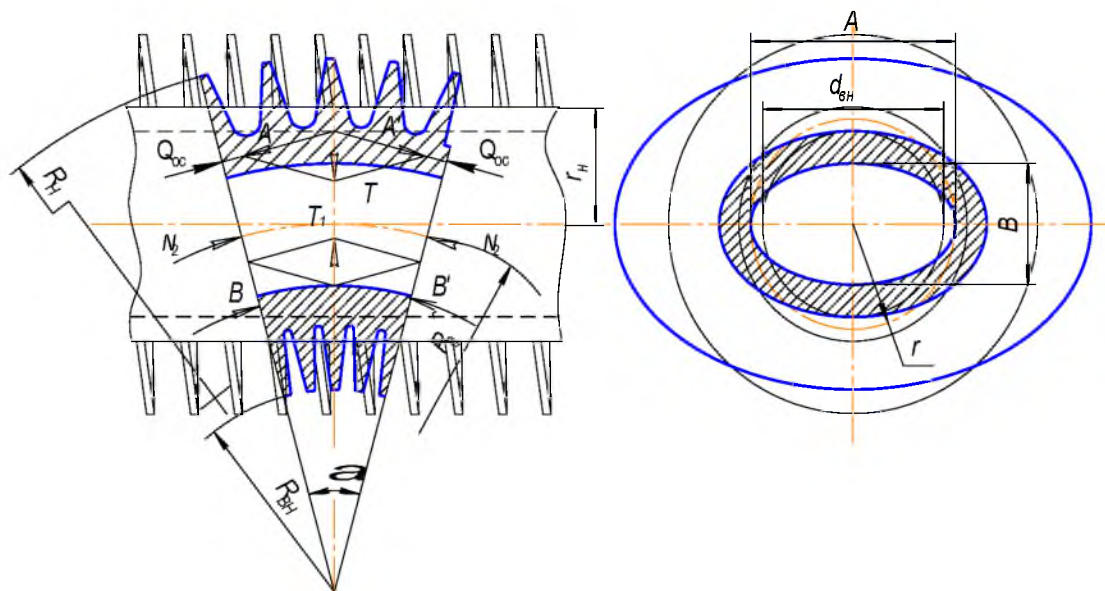


Рис. 5. Действие сил в продольном сечении на участок изгиба оперённой монометаллической трубы

При изгибе труб сплющивающие силы могут вызывать поперечную осадку труб, то есть уменьшать длину окружностей поперечных сечений. При сплющивании трубы уменьшается одна из главных осей поперечного сечения (в плоскости изгиба) и увеличивается размер поперечного сечения в направлении, перпендикулярном к плоскости изгиба. При изгибе прямой трубы изменение формы поперечного сечения и толщины стенок происходит неравномерно по всей поверхности изгиба.

Относительная овальность определяется по формуле

$$\theta = \frac{2(d_{\max} - d_{\min})}{d_{\max} + d_{\min}} \cdot 100\% , \quad (9)$$

где  $d_{\max}$  – наружный диаметр трубы по большой оси, мм;  $d_{\min}$  – наружный диаметр трубы по малой оси, мм.

Для выяснения, как уменьшается пропускная способность трубы с овальным сечением, примем, что после изгиба овальное сечение является эллипсом с осями  $A=d_{BH}+a$  и  $B=d_{BH}-a$ .

Площадь проходного эллиптического сечения будет меньше круглого на величину

$$\pi \frac{d_{BH}^2}{4} - \pi \left( \frac{d_{BH}}{2} + a \right) \left( \frac{d_{BH}}{2} - a \right) = \pi \cdot a^2, \quad (10)$$

где  $a$  – величина изменения диаметра трубы после изгиба, мм.

**Результаты и их обсуждение.** Предложенная методика расчёта технологического процесса изгиба оперённых труб проверялась путем моделирования изгибов на ЭВМ, при этом использовались пакеты прикладных программ 3D Studio MAX R5 и SolidWorks 2003 с использованием специальных модулей и приложений (см. рис. 1, в - к). После получения твердотельных ассоциативных моделей, последние подвергались тщательному анализу, в ходе которого устанавливались технологические параметры изгибов, и их соответствие расчётным значениям, полученным из соответствующих аналитических зависимостей. Образцы-свидетели изгибов сравнивались с полученными моделями изгибов на ЭВМ.

**Заключение.** Таким образом, разработанная методология расчёта позволяет производить необходимые расчеты для определения основных параметров технологического процесса изгиба оперённых труб. Предложенные технологии изгиба оперённых монометаллических и биметаллических труб, позволяет получать качественные изгибы при минимальном и минимально возможном радиусах изгиба трубы. Эти технологии изгиба оперённых труб не имеет аналогов в мировой практике, содержит «ноу-хау», они успешно внедрены в производство для массового выпуска различных систем теплообмена для комплектации ими автотракторных заводов.

## Литература

1. Гальперин А.И. Машины и оборудование для гнутья труб. - М.: Машиностроение, 1967. - 181с.
2. Пат. 9668А (Украина). Способ гибки труб. Опубл. Б.И. Промышленная собственность, 1996, № 3.
3. Пат. № 2381859 (РФ). Способ получения змеевикового элемента с U- образными коленами заданной кривизны гибкой монометаллических или биметаллических оперённых труб / Захаров И.С., Емельянов С.Г., Ремнев А.И. / заявл. 16.05.2005; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5. 11 с.
4. Захаров Н.В., Немчунов В.А., Ремнев А.И., Макогон А.А. Новая технология гибки монометаллических цельнооребрённых труб. // Вестник ХГПУ. Вып. 110, Харьков, 2000. – с. 55 – 69.
5. Ремнев А.И. Технология производства систем теплообмена с тонкими трубными решетками. / Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2005. – 236 с.
6. Ремнев А.И., Петrivный В.Н. Особенности расчета изгиба оребрённых монометаллических труб для компрессорных систем теплообмена // Компрессорное и энергетическое машиностроение, Сумы. 2007. № 2 (8). С.37 - 43.
7. Петrivный В.Н., Ремнев А.И. Оценка качества изгиба оребрённых монометаллических труб для компрессорных систем теплообмена // Компрессорное и энергетическое машиностроение, Сумы. 2007. № 3 (9). С.67 - 71.